

10kHzの更新周波数を実現する 高解像度ハプティックコントローラの開発

赤羽 克仁*¹ 長谷川晶一*² 小池 康晴*³ 佐藤 誠*⁴

The High Definition Haptic Controller
which realizes update cycles higher than 10kHz

Katsuhito AKAHANE*¹ Shoich HASEGAWA*² Yasuharu KOIKE*³ Makoto SATO*⁴

Abstract – This paper describes a haptic controller for force feedback system. It is necessary that the frequency of device control is higher than 1kHz. Standard PC environments, however, have no real time operating system, and PC also controls the virtual world simultaneously. Therefore, it is difficult to guarantee the quality of frequency. On the other side, a virtual wall is generally implemented in impedance control with spring-damper model. In the case of usual 1kHz control, high impedance virtual wall is oscillated. When we display very stiff virtual wall, we try to get the parameters of maximum stable impedance, but the virtual wall displayed with these parameters can not satisfy user's request. In this research, we have developed the High Definition Haptic Controller with SuperH4 processor, and put this controller between the PC and the haptic device for the function distribution and the quality of frequency. In order to realize high frequency of device control, the controller also complements haptic information from primitive geometry and impedance of virtual wall. The SPIDAR, wire driven haptic display, is implemented in this controller, and it realizes 10kHz control frequency. Consequently, it became possible to display a very hard and high-resolution virtual wall stably. This means that the High Definition Haptic Controller presents stable haptic and high quality sensation in the virtual environments.

Keywords : Haptic controller , Functional distribution , Virtual stiff wall , Wire driven haptic display

1. はじめに

近年、計算機処理能力の発展により、容易に3次元仮想空間を構築できるようになってきた。3次元空間での操作を行うためのヒューマンインタフェースにおいては、従来のキーボード・マウスなどから、より直感的に3次元空間の操作を可能にするヒューマンインタフェースが要求されている。また、3次元空間内の操作では、ユーザと仮想世界とのインタラクションが操作効率や、仮想世界への没入感を増加させることができると考えられ、ユーザへのフィードバック機能を持つ力覚提示装置が盛んに研究開発されている。

力覚提示を仮想空間内で行うには、

- ・ 位置・姿勢計算

- ・ 力覚レンダリング
- ・ 各アクチュエータの発生するトルク計算
- ・ 仮想世界の管理
- ・ PC－力覚提示装置間の通信

などの処理を行う必要がある。この中で、位置・姿勢計算、各アクチュエータの発生するトルク計算、PC－力覚提示装置間の通信などは、人間が力覚を安定に感じるために1kHz以上の更新周波数で処理を行う必要がある。しかし、通常使用しているPC環境は、画像提示のための数10Hzのビデオレートに対しては、ハードウェアレベルでの対応がなされており高度で複雑なコンピュータグラフィックスのレンダリングが可能になっているが、力覚提示のことを考慮したハードウェア設計は、まだ一般にはなされていない。

また、PC環境におけるOS(Windows, Linux, MacOSなど)にはリアルタイム性がないため、仮想世界の管理を行いながら、精度のよい1kHzでの力覚提示を行うことは、計算機能力が向上した現在でも難しい

*1: 大学院 総理工学研究科

*2: 東京工業大学 精密工学研究所

*3: 東京工業大学 精密工学研究所

*4: 東京工業大学 精密工学研究所

*1: Graduate School ,Tokyo Institute of Technology

*2: P&I Lab. ,Tokyo Institute of Technology

*3: P&I Lab. ,Tokyo Institute of Technology

*4: P&I Lab. ,Tokyo Institute of Technology

問題である。また、次世代ヒューマンインタフェースとして力覚提示装置を考えた場合、利用者の利便性は重要であるため力覚提示のために特殊なリアルタイムOSを利用することは考えにくい。

そこで、PCのOSによらず力覚提示のための更新周波数 1kHz を安定に確保するために、PCと力覚提示装置の中間層にハプティックコントローラを配置し、力覚提示固有の処理の機能分散を図る。

一方、インピーダンス制御における硬い物体の提示には、高速な制御が必要なが知られている [2] [3] [4]。力覚提示装置では、1kHz 程度まででは実現され仮想物体との間の力覚提示を可能にしている。しかし、1kHz の制御で安定提示可能な提示面のインピーダンスには制限があり、この制限内で提示可能な最大インピーダンスの面を提示しても、その面の硬さのクオリティはユーザが満足するものではなく、インピーダンス制御の特徴である実際には進入しあうことのない物体同士が進入してしまうような感覚をユーザに与えてしまい、力覚提示におけるユーザの没入感や、操作性の低下の大きな要因であった。

そこで、より現実近く、硬いものは硬い面として提示するため、従来から力覚提示の制御に必要とされる 1kHz の更新周波数を一桁上回る 10kHz という高速な制御を行うことを目指す。

また、高速応答性を目的として、仁木・下条 [9] は 1 自由度の簡易型ハプティックディスプレイを開発している。これは、10kHz の更新周波数を実現しているが、振動感覚提示を目的としており、仮想壁のインピーダンスについては、触れられていない。

本研究では、組み込み向け CPU である SuperH4 プロセッサを搭載した高解像度ハプティックコントローラを開発し、従来 PC で行っていた力覚提示固有の処理を機能分散させる。そして、プロセッサの高速な I/O 特性を活かし、力覚提示装置の更新周波数をより高くすることで、仮想壁のインピーダンスがより高い領域でも安定に力覚提示を可能することを目指す。さらに、仮想壁上に微細な凸形状をレンダリングし、従来よりも高い解像度の形状提示を可能にすることを目指す。

2. 機能分散

力覚提示装置固有の処理には、力覚ポインタの位置・姿勢計算、アクチュエータの発生するトルクの計算(張力計算または関節トルク計算)などがある。これらの処理は、更新周波数を 1kHz 以上で行わなくては人間が力覚を安定に感じることができない。また、本報告では 10kHz という更新周波数を実現するため、PC のリアルタイム性のない OS 上で処理してはこれを実現することは困難である。

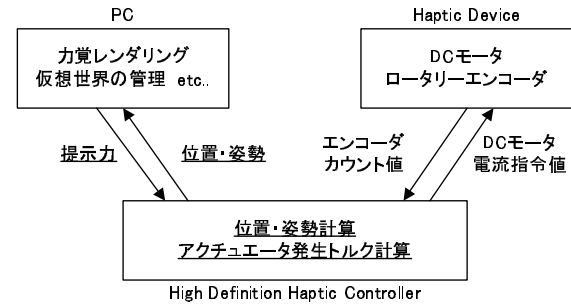


図1 機能分散

Fig.1 Function distribution

そこで、ホストとなる PC と力覚提示装置の中間層で力覚提示装置固有の処理を高速に行う方が安定に更新周波数を維持できると考えられる。そして、PC の負荷も軽減することが可能となり、仮想世界の質・規模などがより高くなるものと考えられる。

このようなシステムを構築するために、力覚提示のために PC を用意し、リアルタイム OS を用いることで、精度のよい 1kHz の制御をし、世界管理を行うホストとなる PC と通信を行い、力覚提示を行うシステムも考えられている。しかし、システムが巨大化する傾向やユーザの利便性に難があり、我々が目指すユニバーサルデザインを取り入れた、力覚提示装置の設計思想から大きく外れることになる。そこでハードウェアインタフェースに汎用性があり、誰でも容易に利用可能な軽量小型なコントローラが必要となる。

またこのような、PC よりも構成が簡素な小型コントローラによるシステム配置により、開発時のデバッグ対象を中間層のコントローラに集中することができるため、致命的なバグによるシステムの停止などが発生した場合でも、その影響を最小限に抑えることができる。これは、開発効率の向上と開発者の精神的疲労を軽減すると考えられる。

一方、VR アプリケーション開発側から考えた場合、力覚提示装置固有の情報など(ワイヤ長、関節角)の低水準の情報よりも、位置・姿勢などのような、デバイスに依存しない高水準の情報で、力覚提示装置を制御するほうが、VR コンテンツ開発が容易になると考えられる。そこで、ハプティックコントローラが担当する処理として、位置・姿勢計算、各アクチュエータに発生させるトルクの計算などが、望ましいと考えられる。

3. 高更新周波数の実現

力覚レンダリング(提示力の計算)は、一般に仮想壁と力覚ポインタとの間のバネ・ダンパモデルにより計算されるが、Minsky ら [4] は、このときのインピーダンスと更新周波数の関係を導いた。また、colgate

ら [2] は、インピーダンス制御の力覚提示装置において、0 次ホールドによる離散的なモデルを導入し、力覚提示装置固有のダンパ定数と仮想壁のインピーダンス、および更新周期の間の関係式 (式 1) を導いた。

$$b > \frac{KT}{2} + |B| \quad (1)$$

b : デバイス固有のダンパ定数 T : 更新周期
 K : 仮想壁バネ定数 B : 仮想壁ダンパ定数

これは、高硬度な仮想壁を提示すなわち K を大きくしたければ、更新周波数を高速にすなわち T を小さくしなければならないことを意味する。しかしながら、PC - ハプティックコントローラ間の通信速度は 1kHz 程度のため、それ以上の更新周波数を実現する場合ハプティックコントローラで力覚レンダリングを行い、更新周波数を加速させる必要がある。

このような、処理を仮想世界の管理と力覚提示の 2 つに分け、仮想世界の管理を低速で行い、力覚提示の制御を高速に行う方法は、力覚提示プロセスの分離として提案されている [5] [6]。これは、仮想世界管理プロセスと力覚提示プロセスのプロセス間通信に平面や球などの基本形状を用いている。そして、力覚提示プロセスを 1kHz 程度まで行うシステムは提案され、より複雑な仮想世界を表現可能になっている。

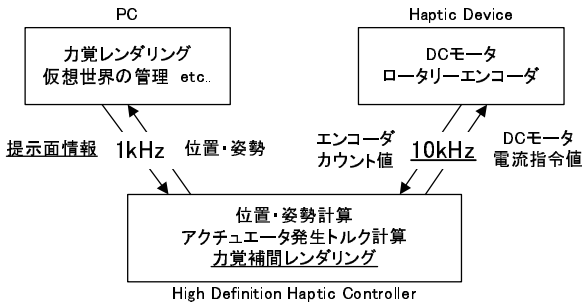


図2 高更新周波数の実現
Fig. 2 Realization of high updating frequency

3.1 力覚補間レンダリング

PC-ハプティックコントローラ間の更新周波数 1kHz とハプティックコントローラ-力覚提示装置間の更新周波数 10kHz の間を補間をおこなう。このとき、[5] に見られるような形状特徴という高度な情報は、力覚レンダリングに時間がかかる。そこで、よりハプティックコントローラの処理を軽減するため、本報告では、PC から送られてくる力覚ポイントとの相対的な提示面の位置・姿勢情報、およびインピーダンス情報から、提示力ベクトルを補間することを考える。

$$\Delta p = p - p_0 \quad (2)$$

$$x = \frac{W_0 \cdot \Delta p}{W_0 \cdot W_0} W_0 \quad (3)$$

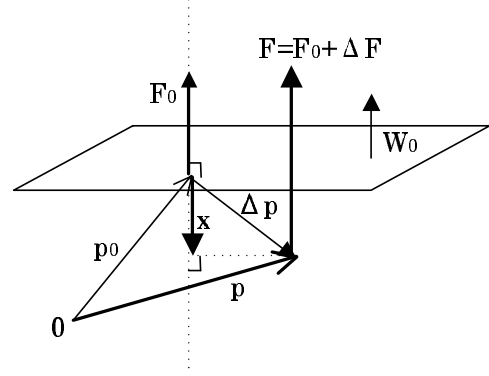


図3 力覚補間レンダリング
Fig. 3 Haptic complement rendering

$$\Delta F = -kx - b\dot{x} \quad (4)$$

$$F = F_0 + \Delta F \quad (5)$$

k : 仮想壁バネ係数 b : 仮想壁ダンパ係数

まず、ハプティックコントローラは、力覚ポイントの位置 p_0 ・姿勢を PC 側に送信する。

その力覚ポイントの位置・姿勢に基づき、PC 側は力覚レンダリングを行い、提示面の向きとその提示面に対する力覚ポイントの進入量を算出する。この向きと大きさを持つベクトルを W_0 とする。そして、この提示面の面情報であるインピーダンス情報のバネ定数 k 、ダンパ定数 b と共に W_0 を PC からハプティックコントローラに送信する。

ハプティックコントローラは、この PC から送信された W_0 、 k 、 b を用いて、次に PC から新しい面情報が送られてくるまで、この情報に基づき以下の力覚補間レンダリングを行う。

まず、ハプティックコントローラは位置・姿勢を更新する。更新された位置を p とする。前回 PC に送った位置 p_0 との変位 Δp を求める (式 2)。そして、提示面 W_0 に垂直な Δp の成分である x を求める (式 3)。この x が提示面 W_0 に対する更新された進入量となる (図 3)。この進入量と、位置の微分による速度をもちいて提示力を更新すること (式 4) (式 5) で、力覚補間レンダリングを行う。

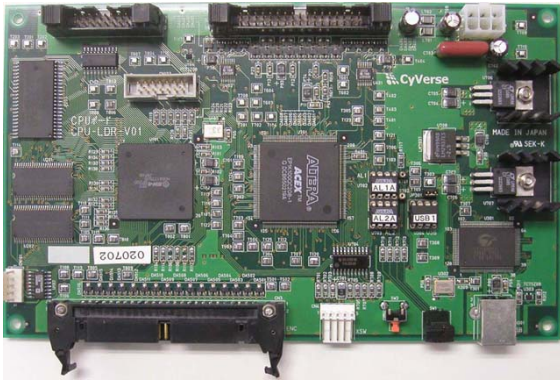
4. 高解像度ハプティックコントローラ

PC と力覚提示装置の中間層に配置する開発した高解像度ハプティックコントローラのボードの写真を図 4 にシステム構成を図 5 を示す。

4.1 SuperH4 プロセッサ

ハプティックコントローラのプロセッサに要求される要素として、

- ・ 力覚提示装置の処理を高速に処理することができるプロセッサであること。



(20x12mm)

図4 高解像度ハプティックコントローラ
Fig.4 The High Definition Haptic Controller

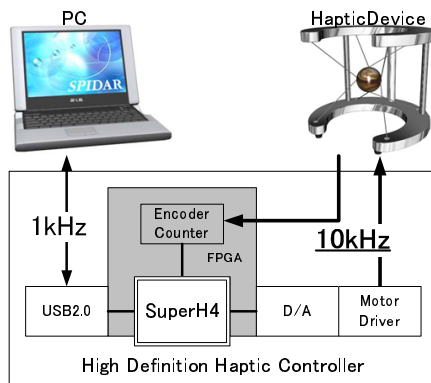


図5 システム構成
Fig.5 System configuration

- ・ 開発ボードをできるだけ小型化するためにプロセッサを容易に搭載可能であること。
- ・ 開発環境が整っていること。
- ・ 消費電力が低いこと。

などがあげられる。

そこで、我々はスーパスカラ 5 段パイプラインを持つ日立製作所 (現 ルネサステクノロジ) 製、32Bit RISC CPU SH7750(200MHz)(以後 SH4 と略) をハプティックコントローラの制御に用いた。SH4 シリーズは、浮動小数点演算ユニットを搭載し、マルチメディア処理に多用される行列演算を高速に解くことができる。我々は、SH4 プロセッサの CPU に搭載される浮動小数点演算ユニット、割り込みコントローラ、バーステートコントローラ、タイマ、DMA コントローラなどを有効に利用し、開発ボードの小型化、演算の高速化を図った。また、開発環境には Hitachi Embedded Workshop(HEW2.2) を使用し、C/C++ コンパイラ・アセンブラに SuperH RISC engine toolchain7.1.02 を用いた。

4.2 USB2.0 インタフェース

本研究室では、従来は PC とハプティックコントローラ間の通信には、ISA, USB1.0/1.1 などを利用していたが、利用者の利便性、通信ボトルネックなどの問題点があった。そこで、高速通信、利用者の利便性などを兼ね備えた、USB2.0 インタフェースを PC-ハプティックコントローラ間の通信に用いることで、これらの問題を解決した。

チップには Cypress 社製 EZ-USB FX2 を搭載し、バス速度に最大 480Mbps をもつハイスピードを用い、転送タイプにバルク転送を用いた。データのペイロードサイズは、最大の 512 バイトとし、送信・受信各 1 つずつのエンドポイントを割り当てた。また、SH4 は USB パケット受信を外部割り込みとして受信イベントを取得するようにされている。

一方、PC 側のデバイスドライバとして、Cypress 社製 EZ-USB Development Kit 付属のドライバを用いた。

4.3 その他

ALTERA 社製 FPGA を搭載し、システム全体のリセット、ボード上に詰まれている USB, D/A のコントロールなどを行っている。また、ロータリエンコーダのカウンタを実現しており、カウンタ部には位相が 90 度異なる A 相 B 相を用いて 4 通倍するカウンタを用いている。

そして、USB エンドポイント、D/A、エンコーダカウンタは、FPGA により SH4 のアドレス空間にマッピングされている。また、メモリは起動時のための Flush メモリ (2MB) と、プログラム実行用の SDRAM(64MB) が、各々 SH4 のアドレス空間に接続されている。

4.4 SuperH4 処理

SH4 プロセッサの実装には、処理の高速化のためリアルタイム OS などは使用せず、開発言語に C 言語とアセンブラ言語を用いて実装した。実行時の SH4 の処理フローを図 6 に示す。

4.5 力覚提示処理フロー

SH4 のタイマ割り込みを利用し、10kHz の更新周波数で、力覚提示装置固有の処理を行う。まず、エンコーダホールドにより、各ワイヤ長/関節角を計測する。算出されたワイヤ長/関節角から、力覚ポインタの位置・姿勢計算を求める。また、速度を位置の微分より求め、IIR フィルタにより高周波ノイズをフィルタリングする。

次に、PC から USB 経由で送られてきた提示面情報である提示面の位置・方向、インピーダンス情報から、更新された力覚ポインタの位置・速度に対して、力覚補間レンダリングを行う。

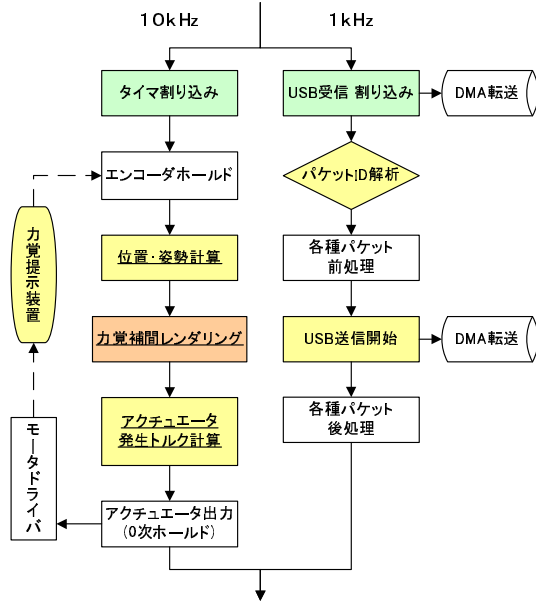


図6 SH4 高更新処理フロー
Fig.6 SH4 Processing flow

得られた提示力に対して、各アクチュエータの発生トルクを計算する。最後に、モータドライバに対して指令値を0次ホールドにより出力する。

4.6 USB パケット 処理フロー

力覚提示処理を行う一方で、PCから送信されてくるデータは、USB FIFO データ割り込みによってSH4が検出する。データ512Bytesの先頭2Bytesを識別子とし、識別子の内容に従って、SH4は各々の処理を行う。

USB FIFO と SDRAM 間のデータ転送には、SH4に内蔵されているDMAコントローラを用いることで、転送スケジューリングをハードウェアレベルで処理し、バスの効率化とともに、SH4のパイプラインストールを極力抑える実装を行った。

4.7 力覚提示装置 SPIDAR

高解像度ハプティックコントローラを用いて、ワイヤ駆動型力覚提示装置SPIDARの実装を行った。

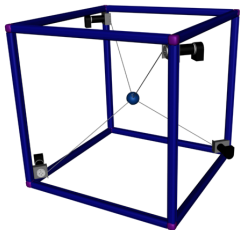


図7 SPIDAR
Fig.7 SPIDAR

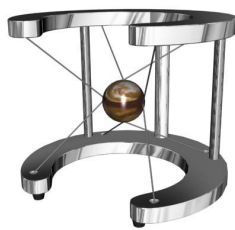


図8 SPIDAR-G
Fig.8 SPIDAR-G

図7のSPIDARは、力覚ポイントにワイヤを4本接続し、力覚ポイントを質点として3自由度の位置計測と、並進力を提示するヒューマンインタフェースで

ある。一方、図8のSPIDAR-Gは、力覚ポイントにワイヤを8本接続し、力覚ポイントを剛体として6自由度の位置・姿勢計測と、並進・回転力を提示するヒューマンインタフェースである。

4.8 位置・姿勢計算

力覚ポイントの位置・姿勢計算は、各ワイヤの長さからエンドエフェクタの位置・姿勢を推定する計算である。また、張力に基づく力覚提示のためには、提示自由度+1次元[8]のアクチュエータが必要であるため、計算式は冗長となる。

ワイヤ駆動型力覚提示装置の姿勢計算には大きく分けて、力覚ポイントの重心や、ワイヤ接続位置などの座標を、ワイヤ長さの関係式と機構の拘束条件から冗長性をなくす工夫をして厳密解を算出しているもの[1][8]と、一般には入力ベクトルと位置・姿勢ベクトルの関係は非線形となるが、複雑な非線形方程式を解く代わりに、ヤコビ行列の擬似逆行列を用いた逐次近似により位置・姿勢ベクトルを求めるものがある[7]。

前者は、厳密解を求めることができるが、力覚提示装置の機構に応じた特性を利用して、算出方法を各装置ごとに実装しなくてはならない。一方、後者は機構の変更に柔軟に対応でき、より汎用性が高い。また、逐次近似により誤差が残るという問題が考えられるが、逐次近似の更新周波数を十分に高くすることにより、精度のよい解が得られる。本報告では、更新周波数を10kHzというより高速な制御を用いているため、より機構の変更に柔軟に対応できる逐次近似法を用いて力覚ポイントの位置・姿勢を求めた。

4.9 アクチュエータ発生トルク計算

与えられた力覚を発生する、各アクチュエータのトルクを求めるために、精度と安定性を考慮した二次計画法によるトルク計算法が提案されている[10]。これは、精度と安定性のトレードオフをあらわす変数 k を用いて、二次項を正定対称行列にしている。また、制約条件は各アクチュエータのトルク範囲、すなわちボックス条件となる。二次計画法(式6)の次元数は、アクチュエータの数に等しいので、最低でも提示自由度+1次元[8]の二次計画法を高速に解く必要がある。

$$\min J = \min_{\tau} \frac{1}{2} \tau^T Q \tau - c^T \tau \quad (6)$$

$$(\tau_{min} \leq \tau \leq \tau_{max})$$

J : 目的関数 Q : 二次項 (正定対称行列)

c : 一次項 τ : アクチュエータ発生トルク

τ_{min} : 最小トルク, τ_{max} : 最大トルク

この二次計画法(式6)の解法に有効制約法(Active Set Strategy methods)と呼ばれるものがある。これは、最適解に収束するまで、双対変数の条件から境界

条件を切替えながら、実行可能領域内を探索していく方法で、中・小規模の解法として広く利用されている。

本研究では、この解法を用い張力計算のための二次計画法を、高解像度ハプティックコントローラのために実装した。そして、この処理を 10kHz 以上で行うため、制約条件はボックス条件であること、そして目的関数の二次項は正定対称行列であることから、各探索にかかる計算量を軽減した。

また、一般に力覚ポインタの位置・姿勢には空間的局所性がみられ、提示力には時間的局所性がみられるため、1step 前の解と現在の解にはそれほど変化がみられない。そこで、最適解の探索初期解に 1step 前の最適解を用いることで、この問題を高速に解くことを可能にした。

5. 評価実験

開発した高解像度ハプティックコントローラの解像度を評価するために、以下の実験を行った。また、以下の実験においてホストとなる PC は、Pentium4 3.2GHz を用い、OS に WindowsXP Professional を用いた。

5.1 モータドライバ周波数特性

ハプティックコントローラが生成する信号が、どの程度 DC モータに伝達されているかを計測するため、モータドライバの周波数特性を計測した。使用した DC モータは、maxon RE25(118746) で、計測したモータドライバを図 9 に測定結果を図 10 に示す。

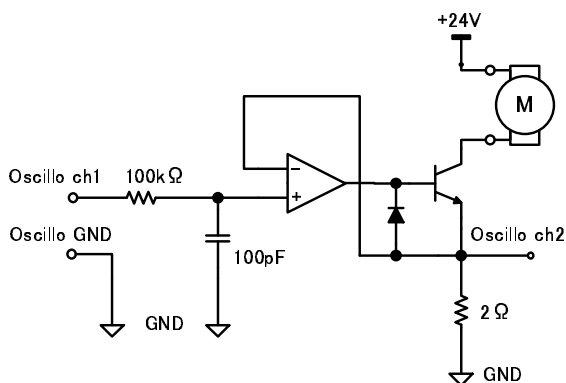


図 9 Motor Driver
Fig. 9 Motor Driver

図 10 より、高域遮断周波数は 100kHz 程度、位相特性も本報告が対象としている更新周期 10kHz 程度では遅延もわずかであるので、このモータドライバは十分な性能を有していることが分かる。

5.2 更新周波数の測定

高解像度ハプティックコントローラの図 6 で示した処理方法により、性能評価として 1kHz の更新周波数で PC と通信を行いながら、10kHz の更新周波数で 3 次元力覚提示装置 SPIDAR をローカルに制御する状況

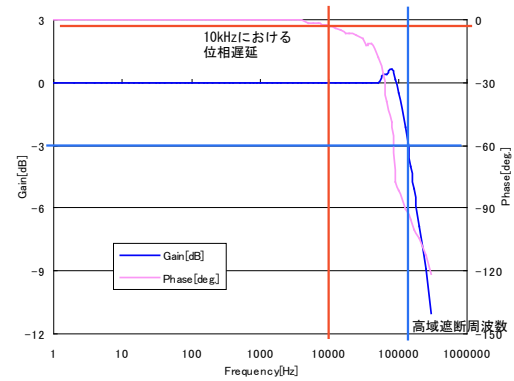


図 10 Motor Driver 周波数特性
Fig. 10 Motor Driver bode diagram

下で、SH4 の処理状況を計測した。本報告では、SH4 にリアルタイム OSなどを搭載していないため、USB からの 1kHz でのパケット送受信時に処理の負荷が大きくなり、10kHz の力覚提示の制御周期が乱される可能性がある。(図 11) これは、図 6 の USB 処理フローにおいて、DMA 転送を行わずに CPU が USBFIFO から SDRAM にデータ転送を行ったときのものである。

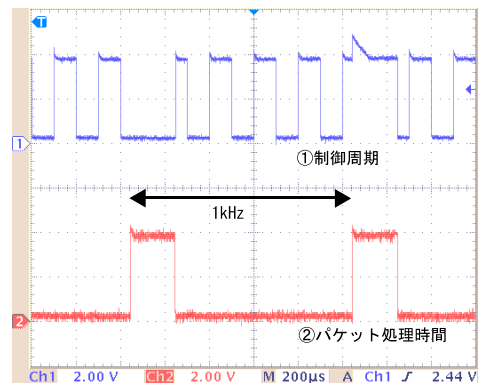


図 11 更新周波数の測定（制御周期の乱れ）
Fig. 11 Measurement of updating frequency (disorder of a control cycle)

そこで、そのような通信を行う状況下でも、本実装による制御が高精度な 10kHz の更新周波数を維持できていることを保証するため、制御周波数の計測を行った。

また、PC－ハプティックコントローラ間の通信は、WindowsAPI であるマルチメディアタイマによるイベント駆動により通信周波数である 1kHz の実装を行った。

計測には、SH4 の予備入出力として用意した TTL レベルの端子を用い、出力ロジックをオシロスコープにより計測した。結果を図 12 に示す。

制御周波数は、図 12 の 1 の波形で、力覚提示処理フローの開始ごとにロジックを反転することで、計測

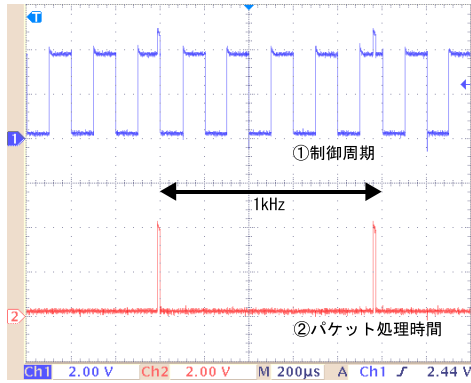


図 12 更新周波数の測定
Fig. 12 Measurement of updating frequency

した。また、パケット処理時間を図 12 の 2 の波形として計測した。

図 12 より、パケット処理にかかる時間はわずかであり、本報告が対象としている 10kHz では、パケット送受信時においても、制御周波数 10kHz を乱されること無く、処理が行われていることがわかる。

5.3 仮想壁への接触実験

3 自由度ワイヤ駆動型力覚提示装置 SPIDAR (図 7)(各辺 0.4 [m]) を高解像度ハプティックコントローラによって制御し、仮想壁の提示を行った。使用したデバイスの仕様を表 1 に示す。

表 1 SPIDAR の仕様

DC モータ	maxon RE25(118746) 定格出力: 10.0[W]
エンコーダ	MR エンコーダ 1000[カウント/回転]
プーリ	半径: 8[mm]
ワイヤ	東レ スーパーストロング PE (高弾性率ポリエチレン繊維)4.0 号

表より、エンコーダカウンタは 1000[カウント/回転] をカウンタにより 4 通倍しているので 4000[カウント/回転]、よって、ワイヤ長計測は 0.01255[mm/カウント] の精度を持つ。

5.4 安定仮想壁提示実験

$y = k$ ($k = -0.05$ [m]) に仮想壁を作り、更新周波数 1kHz, 5kHz, 10kHz によるバネ係数-ダンパ係数の発振の有無を調べる。実験は、力覚ポイントに質量 m (50[g]) の重りを取り付け、仮想壁に接触させる。右手でマウスを操作することで仮想壁のバネ係数を調整し、指定したダンパ係数の時に、安定な仮想壁の提示に必要な最大のバネ係数を求めることで行った。また、提示面軸方向 (y 軸) の力覚ポイントの軌跡をリアルタイムで描画し、その軌跡から発振の有無を判断することとした。

実験の様子を図 13 に示す。

また、図 14 に各更新周波数に対する実験結果を示す。

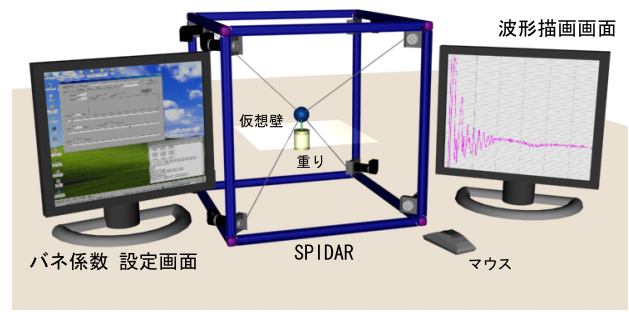


図 13 安定仮想壁提示実験
Fig. 13 Stable virtual wall presentation experiment

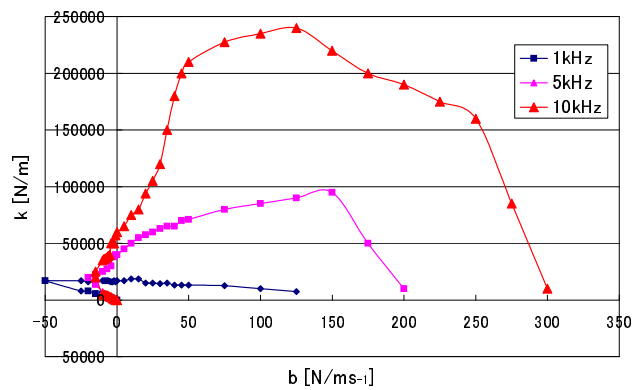


図 14 k - b 曲線 ($m = 50$ [g])
Fig. 14 Curve of k vs. b ($m = 50$ [g])

5.5 結果と考察

図 14 より、従来の 1kHz の更新周波数では、20000[N/m] 程度のバネ係数が仮想壁を提示できる限界であったが、より更新周波数を高くすることで、10kHz の更新周波数では、240000[N/m] 程度のインピーダンスを持った仮想壁を提示することが可能になることがわかる。

これにより、従来では、発振して提示することすらできなかった領域が提示可能になり、今までの力覚提示能力を遥かに超えた力覚提示が可能になると考えられる。またこれは、ユーザの安全性に対するマージンをより広く持つことができ、ユーザが安心して力覚呈示装置を利用できる環境の構築につながると考えられる。

5.6 被験者に対するフラットな仮想壁提示実験

これは、安定仮想壁提示実験では、力覚ポイントの発振は起こらないが、実際に人間が触ると、それはフラットなつるつとした面というよりも、細かなざらざらした面として感じてしまうため、人間がフラットな面として感じるのは、どの程度までのインピーダンスなのかを調べるためである。また、これは実際に高解像度力覚提示アプリケーションを作成する際の仮想壁

インピーダンスの設計指針となると考えられる。

実験内容は、被験者は右手でマウスを操作し仮想壁のバネ係数調整スライダーを調整しながら、左手で力覚ポインタを握り、フラットな面だと感じる最大のバネ係数を求める実験を行った。また、被験者に視覚的な影響を与えないため、力覚ポインタの軌跡描画は行わなかった。

また、実験結果を図 15、図 16 に示す。

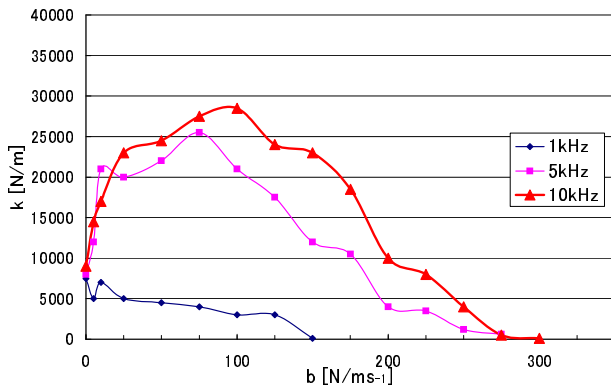


図 15 k-b 曲線 (被験者 A)
Fig. 15 Curve of k vs. b (subject A)

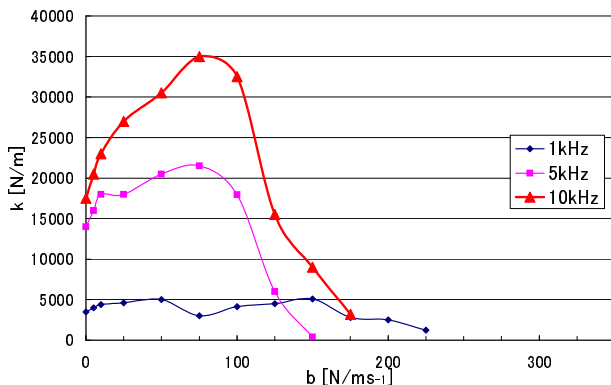


図 16 k-b 曲線 (被験者 B)
Fig. 16 Curve of k vs. b (subject B)

5.7 結果と考察

実験結果より、被験者が、フラットな仮想壁だと感じる面のインピーダンスは、個人差は多少あるものの従来の 1kHz の更新周波数では、最大で 5000~7000[N/m] 程度であるのに対し、10kHz の更新周波数を用いることで 30000~35000[N/m] 程度まで提示可能になることがわかる。これにより、k-b 曲線の内側のインピーダンスは、高解像度力覚提示アプリケーション作成時の、ユーザがフラットだと感じる仮想壁インピーダンスの目安になることがわかる。

また、安定提示とのインピーダンス曲線の間に大きな開きがある。これは、発振し面提示ができないほどの振動ではないが、ノイズによりユーザが面をフラッ

トだと感じずに、ざらざらした面として感じてしまうことにある。ノイズの原因として、まずエンコーダによる量子化ノイズがある。また、エンコーダ値から力覚ポインタの位置・姿勢を計算し、そこから速度を後退差分で求めているため、計測による誤差がこれらの処理により増幅されることが考えられる。本報告では、このノイズをカットするために IIR フィルタを用いたが、より最適なフィルタの選択が必要だと考える。

5.8 凸仮想壁の提示

解像度の計測を行うため、更新周期 1kHz, 5kHz, 10kHz において、式 (7) で生成される形状を提示し、あるバネ係数 (および、ダンパ係数) において、形状の大きさを変化させて、形状を感じる最小の高さを記録した。また、形状の幅は高さの 5 倍とした。

$$y = y_0 + \frac{h}{2} \left(1 + \cos\left(2\pi \frac{x}{w}\right) \right) \quad (7)$$

$$\left(-\frac{w}{2} \leq x \leq \frac{w}{2} \right)$$

図 17 に 10kHz の更新周波数で実際に提示した仮想壁を x 軸方向+になぞったときの x 軸方向の軌跡を示す。

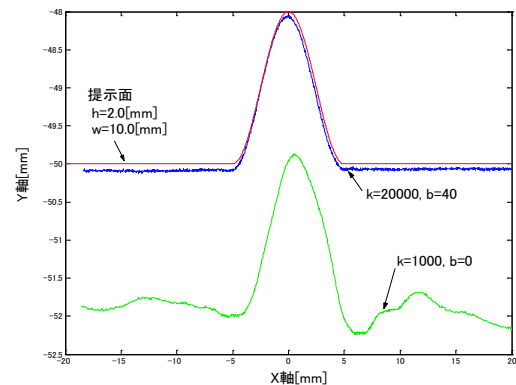


図 17 提示面の軌跡
Fig. 17 The trajectory of the pointer on a virtual wall

また、結果を図 18 に示す。

5.9 結果と考察

図 18 より、更新周波数を高速にし、バネ係数を上げることで、より提示面に正確で、微小な凸を提示できることがわかる。また、更新周波数が 5kHz と 10kHz であまり差が出ないことから、エンコーダの精度、糸の伸びなどによる誤差が影響しているものと考えられ、誤差による微小な振動なのか、提示波なのか分からずに被験者が判別できなかったためと考える。

6. まとめと課題

我々は、力覚提示装置のための高解像度ハプティックコントローラを開発した。これにより、力覚提示装置固有の処理を機能分散させることで、従来から問題

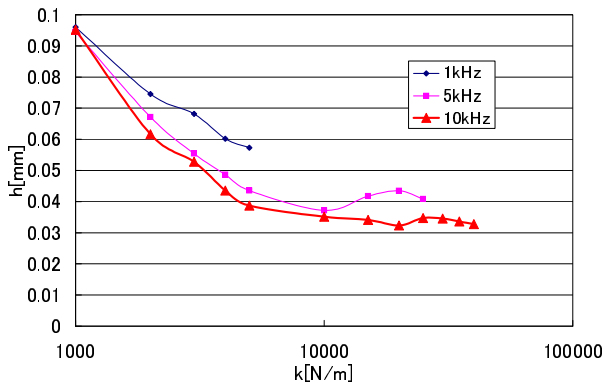


図 18 パネ係数と凸仮想壁の関係

Fig. 18 Relation between a spring coefficient and a convex virtual wall

であった制御周波数の安定維持と PC の負荷の軽減を可能にすることを旨とした。また、高更新周波数を実現するため、計算量が少量で済む力覚補間レンダリングを提案した。そして、高解像度ハプティックコントローラの実装例としてワイヤ駆動型力覚提示装置である SPIDAR を 10kHz の高更新周波数で制御した。

その結果、従来の 1kHz では実現不可能であった、高インピーダンスを持つ仮想壁提示を実現した。また、ユーザの感じるフラットな仮想壁提示に必要なインピーダンスの幅を求めることで高解像度力覚提示アプリケーション作成時におけるインピーダンスの設計指針を示した。また、凸仮想壁提示実験から、インピーダンス調整だけでなく微小な凸形状の提示も可能となるので、力覚提示装置の解像度の高精細化と表現能力の増加が可能となった。

今後の課題としては、10kHz よりもより高速な制御がより良い力覚提示を実現するかどうか。現在、アルゴリズムの見直し、および開発言語のアセンブラ化をより促進させ、SH4 アーキテクチャに即したプログラム開発を進めている。これにより、より高速な制御の実現や、ハプティックコントローラ側がより多くの機能分散を行うことができるようになると思われる。

また、被験者に対するフラットな仮想壁提示実験や凸仮想壁の提示でわかるように、ノイズによる性能劣化が見られた。これらの要因のひとつとして、力覚ポインタの速度を位置の後退差分により求めているため、ノイズの増幅が生じてしまうことが上げられる。これは直接速度を求めることなどにより改善されることが考えられ、より性能の向上が望まれると考える。

また、本報告では、仮想世界は、スタティックな世界であったが、ダイナミックな世界において提案した力覚補間レンダリングがどの程度有効であるのか検証する必要があると考えられる。

また、力覚の安定提示という観点から行った実験で

は、ユーザがフラットだと感じるインピーダンスよりもより高インピーダンスをもつ仮想壁の提示も可能であることがわかった。これより、フラットだと感じる仮想壁をベース面として、そこに安定提示で許されるより広範囲のインピーダンスを混ぜることで、今までには提示困難であった様々な仮想壁の材質表現を可能になるのではないかと考える。

謝辞

本研究に機材を提供していただいた日立製作所 中央研究所の内山邦男様、十山圭介様、在塚俊之様に感謝の意を記します。

参考文献

- [1] 佐藤誠, 平田幸広, 河原田弘: 空間インタフェース装置 SPIDAR の提案, 電子情報通信学会論文誌 Vol.J74-D-2, o.7, pp.887-894 1991.
- [2] J.Edward Colgate and Gerd Schnkel : Factors affecting the z-width of a haptic display, In Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp. 3205-3210, 1994.
- [3] Lonnie Love and Wayne Book : Contact Stability Analysis of Virtual Walls, Proc. Of Dynamic Systems and Control Division ASME, pp. 689-694, 1995.
- [4] M.Minsky, M.Ouh-Young, O.Steele, F.P.Brooks, and M.Behensky: Feeling and Seeing Issues in Force Display, Computer Graphics (ACM), vol.24, no.2., pp.235-243, 1990.
- [5] Adachi Y., Kumano T., and Ogino K.: Intermediate Representation for Stiff Virtual Objects, Proc. IEEE Virtual Reality Annual International Symposium '95, pp.203-210
- [6] 長谷川晶一, 石井雅博, 佐藤誠, 小池康晴: 力積ディスプレイをもつ動的な仮想世界のための力積に基づくプロセス間通信, 電子情報通信学会論文誌 D-VOL.J82-D- , No.10, pp.1758-1765, 1999
- [7] Yanlin L., Murayama J., Akahane K., Hasegawa S., Sato M.: Development of new force feedback interface for tow-handed 6DOF manipulation - SPIDAR-G&G system-, Proc. The 13th Int. Conf. on Artificial reality and Telexistence, pp.166-172
- [8] Kawamura S., Ito K.: A New Type of Master Robot for Teleoperation Using A Radial Wire Drive System, Proc. IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp. 55-60, 1993
- [9] 仁木亨, 下条誠: 高速応答性を目的とした簡易型ハプティックディスプレイの開発, 日本バーチャルリアリティ学会第 4 回大会論文誌, pp. 131-132, 1999
- [10] 井上雅晴, 長谷川晶一, 金時学, 佐藤誠: 二次計画法を用いたワイヤ駆動型力覚ディスプレイのための張力計算アルゴリズム, 日本バーチャルリアリティ学会第 6 回大会論文誌, pp. 91-94, 2002

赤羽 克仁 (学生会員)



2002 年東京工業大学工学部情報工学科卒業, 2004 年同大学大学院知能システム科学専攻修士終了, 同年同大学院博士課程在学中. 力覚インタフェースに関する研究に従事.

長谷川晶一 (正会員)



1997 年東京工業大学工学部電気電子工学科卒業, 99 年同大学大学院知能システム科学専攻修士終了, 同年ソニー(株)入社, 2000 年東京工業大学精密工学研究所助手, 現在に至る. バーチャルリアリティ, 力覚インタフェース, ニューマンインタフェースの研究に従事.

小池 康晴 (正会員)



1987 年東京工業大学工学部情報工学部卒業, 89 年同大学院総合理工学研究科物理情報工学専攻修了. 同年トヨタ自動車(株)入社, 91 年 ATR 視聴覚機構研究所出向, 92 年 ATR 人間情報通信研究所. 94 年トヨタ自動車(株)に戻る. 98 年東京工業大学精密工学研究所助教授, 現在に至る. 運動制御の神経回路網の研究に従事. 工学博士.

佐藤 誠 (正会員)



1973 年東京工業大学工学部電子物理工学科卒業, 78 年同大学院博士課程修了, 同年, 同大学工学部助手, 現在, 同大学精密工学研究所教授, 現在に至る. パターン認識, 画像処理, ヒューマンインタフェースの研究に従事. 工学博士.